

*Стабильность работы нормально  
проводящих структур при высокой  
средней тепловой нагрузке.*

В.В. Парамонов

ИЯИ РАН, Москва

# Содержание

1. История вопроса, основные понятия, причины развития неустойчивости, основной механизм развития.
2. Связь  $df-dE$ , компенсированные структуры и простые цепочки.
3. Применение и анализ для простой цепочки на примере RFQ.
4. Способы подавления

# История вопроса, основные понятия, .....

Нарушение стабильной работы не очень коротких резонаторов, работающих с высокой средней тепловой нагрузкой.

Тепловая нагрузка  $Ph=dPa/dl$  – в таком виде – это частотно независимый инвариант задачи охлаждения. Второй показатель – Duty Factor (DF)–уже весь режим в целом.

Не очень короткий  $L > (3-4)\lambda$ , (условно).

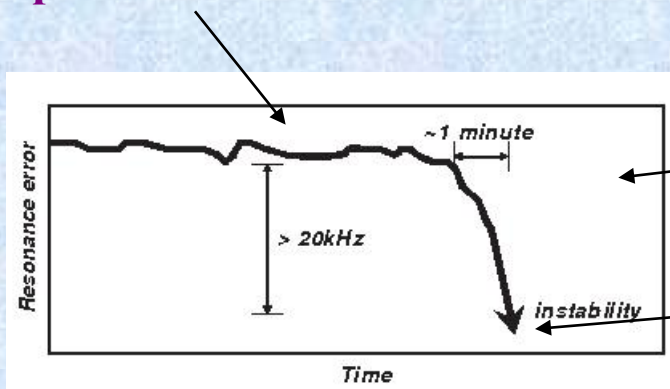
Интенсивные ЛУ Н- - LAMF, ММФ (70 –е годы),  $Ph=(3-5)$  кВт/м,  $DF \sim 3\%$ .

SNS, J-PARC, Linac 4 –  $Ph=(10-45)$  кВт/м,  $DF \sim 6\%$ , до 15%, до 10%.

Разрезные микротроны непрерывного действия  $Ph \sim$ кВт/м,  $DF 100\%$ , специальная процедура ввода ВЧ мощности.

Ходили слухи о  $\sim 230$  кВт/м.....

Проявления -

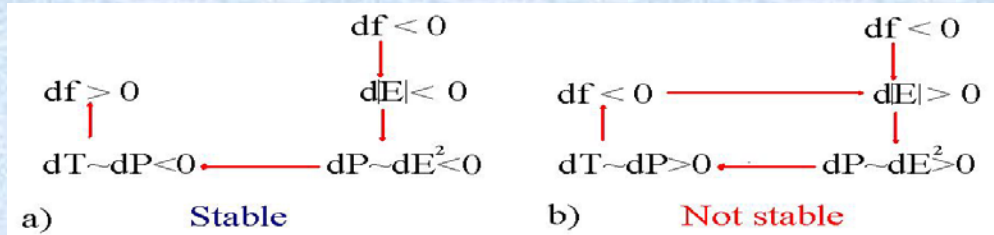


Резонатор с питанием от мощного автогенератора -эксперимент.

И вперед, через необратимые пластические деформации к ....

Причины неустойчивости – флуктуации в режимах. Флуктуации есть всегда. Первый кандидат – охлаждение. Охлаждение производится потоком в турбулентном режиме,  $V \sim (1-3) \text{ m/sec}$ ,  $Re \sim 14000$ .

Пусть есть локальная флуктуация. Средние по резонатору величины обеспечиваются внешними системами. А дальше вариантов два....



Проявление неустойчивости заключается в **нарастающем во времени нарушении продольного распределения поля** в резонаторе.

В этой цепочке два звена без сомнений  $dE - dP$  и  $dP - dT$ . Критичным является соотношение  $df - dE$  – связь локального изменения частоты с вызываемым локальным изменением поля. **Надо  $df < 0$ ,  $dE < 0$ .**

Это зависит от дисперсионных свойств резонатора и их реализации. Метод анализа:

Для бипериодических структур – метод эквивалентных схем, или связанных осцилляторов:

$$\delta f = f_c - f_a$$

$\delta f > 0$  **stable**

$\delta f < 0$  **not stable**

**L. Young**

**Y. Yamazaki**

CW Side Coupled Linac for the Los Alamos/NBS Racetrack Microtron. IEEE Trans. on Nucl. Sci., V. NS-30, n.4, p. 3508, 1983.

Study of Alternating Periodic Structure Cavities with a Disc Loaded Waveguide Model. Part. Accel. v. 22, p. 273, 1988.

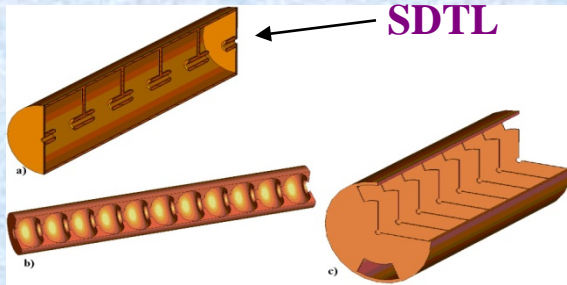
# Электродинамика.

$$E = E_n + \sum_{\nu \neq n} E_\nu \frac{f_\nu^2}{f_n^2 - f_\nu^2} \frac{1}{W_0} \int_{\Delta V} (Z_0^2 H_n H_\nu^* - E_n E_\nu^*) dV.$$

Теорема возмущений в  
многомодовом приближении и  
первом порядке по  $\Delta V/V$

А. Гуревич, Полые резонаторы и  
волноводы, 1952. Б.  
Мулин, Линейные ускорители  
ионов, т.2, 1978

Структуры из простых периодических цепочек Рабочие 0- или  $\pi$ - моды в  
определении трансляции (знакопеременное – запутывает).



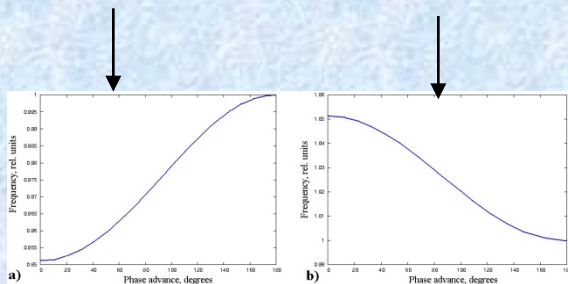
$$E = E_n + \sum_{\nu \neq n} E_\nu \frac{f_\nu^2}{f_n^2 - f_\nu^2} \frac{1}{W_0} \int_{\Delta V} (Z_0^2 H_n H_\nu^* - E_n E_\nu^*) dV.$$

$$E_{m\nu} = E_{\nu 0} \cos(m\nu\pi),$$

$$f_\nu = \frac{f_c}{\sqrt{1 + k_c \cos(\nu\pi)}},$$

$$E = E_n + \sum_{\nu \neq n} 2E_\nu a_\nu \frac{\Delta f_j}{f_j} \cos(jn\pi) \cos(j\nu\pi),$$

Дисперсия



положительная отрицательная

Важен вклад ближайших по частоте мод

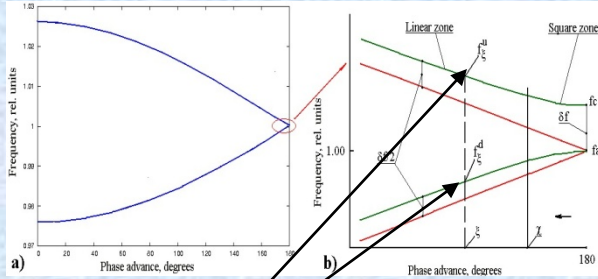
Table 1: Thermal stability of simple structures

Operating mode	Dispersion	Thermal stability
0 ( $2\pi$ )	positive	No
0 ( $2\pi$ )	negative	Yes
$\pi$	positive	Yes
$\pi$	negative	No

V. Paramonov, Proc. Linac 2008, 2008

# Компенсированные (бипериодические, $\pi/2$ моды) структуры, SCS, ACS, OCS, DAW, CDS, PcDTL

## Дисперсия



$$E = E_n + \sum_{\nu \neq n} E_\nu \frac{f_\nu^2}{f_n^2 - f_\nu^2} \frac{1}{W_0} \int_{\Delta V} (Z_0^2 H_n H_\nu^* - E_n E_\nu^*) dV.$$

$$E = E_a \left( 1 + \sum_m \frac{64 \delta f \Delta f_a N_p \cos j \theta_m \cos i \theta_m}{f_a^2 m^2 k_c^2} \right)$$

$$f_\xi^{u,b} \approx f_a + \frac{\delta f}{2} \pm \frac{f_a k_c \xi}{4} - \frac{f_a k_c^2 \xi^2}{8},$$

$$a_{\xi_m} = a_{\xi_m}^u + a_{\xi_m}^b = \frac{(f_{\xi_m}^u)^2}{f_a^2 - (f_{\xi_m}^u)^2} + \frac{(f_{\xi_m}^b)^2}{f_a^2 - (f_{\xi_m}^b)^2}.$$

В компенсированной структуре вклады соседних с рабочим колебаний в распределение рабочего поля (при отклонениях и возмущениях) **компенсируются**

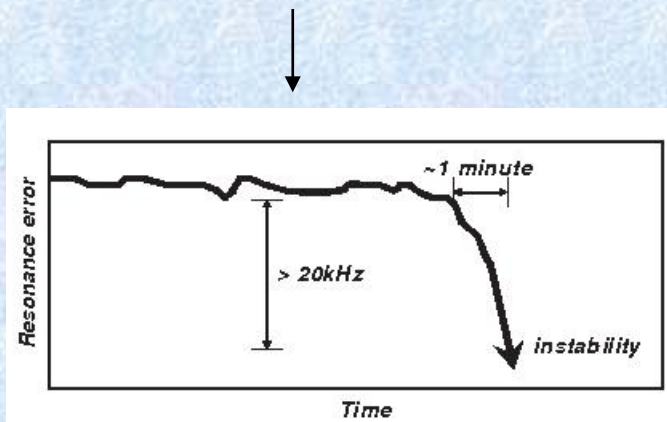
Компенсированную структуру всегда можно настроить (при изготовлении) на условие стабильности  $\delta f \Delta f_a < 0$

ACS J-PARC (до 45 кВт/м), CDS PITZ (до 20 кВт/м),  $\delta f > 0$ .

4-vane RFQ without resonant coupling has 0-type operating TE210 operating mode with **positive dispersion** for TE21n modes. The structures with 0-type operating mode and positive dispersion are **thermally unstable**.

Проявление неустойчивости не является ежедневным явлением, но иногда бывает. После того, как SNS получил **два необратимых** события, они поставили эксперимент.

Резонатор RFQ SNS,  $f=402,5$  MHz, DF=6%.



$$f_n^2 = f_0^2 + \left(\frac{nc}{2L_c}\right)^2, \quad \vec{E}_n = \sqrt{2}\vec{E}_0 \cos\left(\frac{n\pi z}{L_c}\right),$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \sum_n \sqrt{8}\vec{E}_0 \frac{\delta f_0}{f_0} \left(1 + \frac{4L_c^2}{n^2\lambda_0^2}\right) \cos\left(\frac{n\pi z_0}{L_c}\right).$$

Цепочка процессов

$$d(\delta f) \sim \delta x \sim \delta T \sim \delta P \sim \delta E \sim \delta f$$

$$\delta f_0 \sim A_0 e^{\zeta t}$$

$$\zeta \simeq B_0 \frac{P_a}{x_i^2} \frac{L_c^2}{\lambda_0 c V} \frac{\alpha D_c}{E_c}, \quad A_0, B_0 = const$$

Феноменологический подход

## Анализ

$$\zeta \simeq B_0 \frac{P_a}{x_i^2} \frac{L_c^2}{\lambda_0 c V} \frac{\alpha D_c}{E_c}, \quad A_0, B_0 = const$$

режим конструкция материал

Величина инкремента зависит от средней ВЧ мощности и **очень быстро** растет с рабочей частотой  $\zeta \sim f^4$

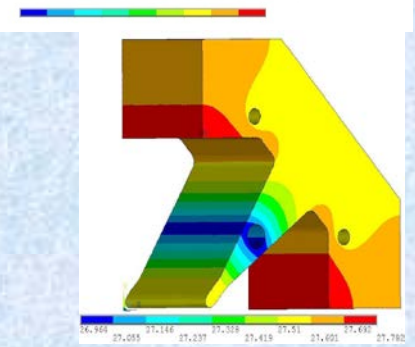
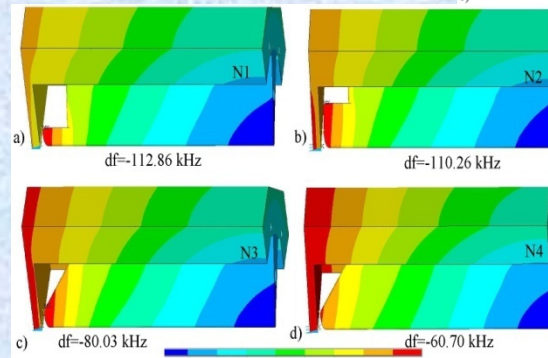
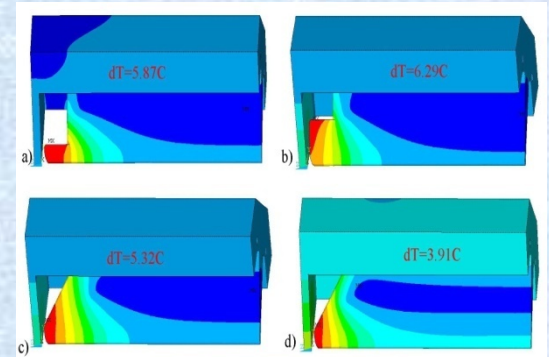
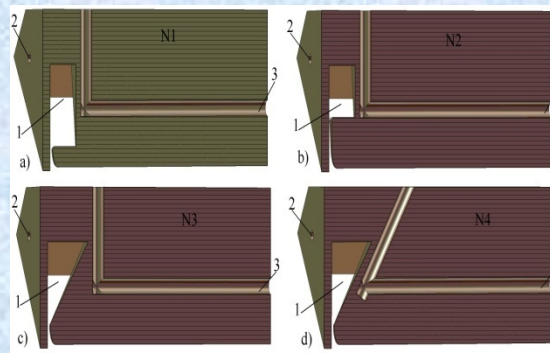
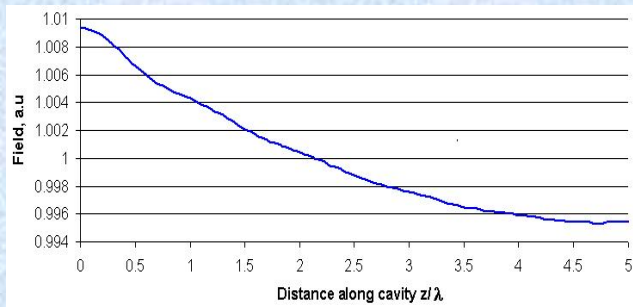
Сравнение RFQ по этому параметру.

Распределение поля в FRQ сильно зависит от погрешностей и уходов торцов – наиболее сильное возбуждение ближайшей моды.  
Есть “погрешности” разработки и конструкции, которые усугубляют ...

$\alpha$  and  $E_c$  are the linear expansion coefficient and Young module for copper,  $D_c = K_c/(\rho_c C_c)$  is the thermal diffusivity for copper,  $K_c, \rho_c, C_c$  are the heat conductivity, density and specific heat values for copper,

Для развития неустойчивости длительность инициирующей флуктуации  $\tau \sim 1/\zeta$ . RFQ, как правило, реализуют с  $E_{\max} = 1,8 E_k \sim f^{1/2}$ , Поэтому **высокочастотный RFQ с высокой тепловой нагрузкой качественно** более чувствителен к флуктуациям режима.

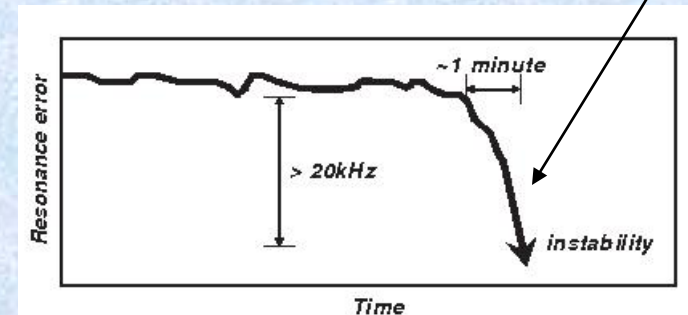
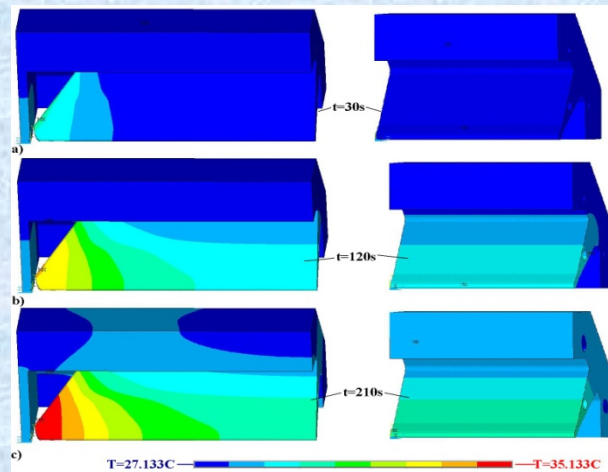




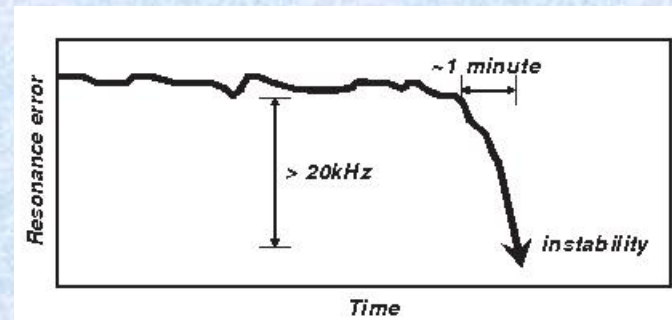
The field distribution along the cavity for the local end detuning  $-0.001 f_0$

Уходы частот торцов разные и для “сапога” эта разница максимальна. Усугубляет – RFQ с нарастающим по длине напряжением. Величина  $1/\zeta$  меньше времени выхода резонатора на режим, можно свалиться сразу

По оценкам (расчетам) все нормально. Есть эффекты, но вроде явно “не значительные”. Стартуем. Но иногда почему то бывает ...



## Как бороться



1. Техническое решение – быстрые тюнеры на торцах. J-PARC, SNS, <1 sec .
2. Техническое решение – независимое охлаждение с регулировкой сегментов RFQ – CERN, IFMIF?
3. Физическое решение – компенсированный RFQ, LEDA, CSNS?
4. В 1 и 2 – главное успеть. С тюнерами – нет проблем. По воде ?
5. Как сформировать компенсированный FRQ?
6. Согласно уставу.

## COUPLED RADIO-FREQUENCY QUADRUPOLES AS COMPENSATED STRUCTURES\*

M. Jean Brownan (AT-6) and Lloyd M. Young (AT-1)  
Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545

**Устав гласит:** Компенсированными называются периодические структуры, в которых на рабочей частоте совпадают частоты двух колебаний с сопряженной четностью распределения поля. Одно из них является рабочим, второе – колебание связи.

1. Берем длинный однородный RFQ и режем на куски, которые объявляем периодами  $d$ .
2. Сопряженная четность – это  $\cos$  и  $\sin$  (magnetic – electric). С рабочим все в порядке с начала. Это  $\cos(0)$
3. Значит в середину периода надо что-то напихать, чтобы на рабочей частоте лег полный  $\sin(2\pi z/d)$  и частота рабочего  $\cos(0)$  не сместилась. Young сделал так.
4. Потом торцы подработать чтобы и  $\sin$  и  $\cos$  не уходили.

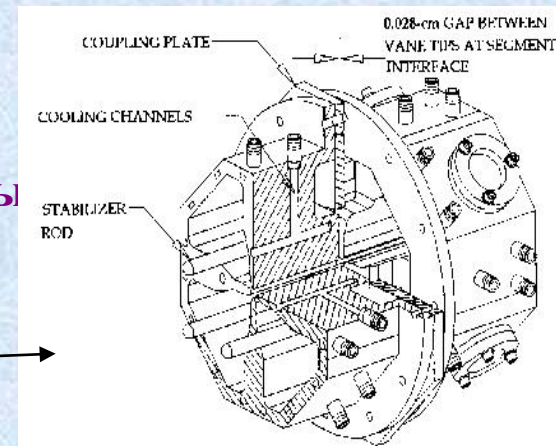
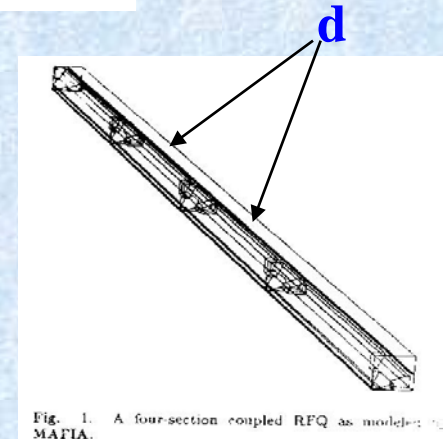


Figure 1 Details of the joint between segments

**Спасибо за внимание!**